

УДК 574.5632.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА МИКРОБИОЦЕНОЗЫ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ПРИМЕРЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И БАКТЕРИЙ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2023 А.В. Огнистая^{1,2}, Т.И. Дункай^{1,2}, И.Г. Тананаев¹, Ж.В. Маркина²

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

² Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

Статья поступила в редакцию 15.02.2023

Оценено влияние свинца, кадмия, никеля, цинка и железа в концентрациях, соответствующих ПДК и 2ПДК на свойства экзометаболитов микроводоросли *Heterosigma akashiwo* в отношении бактерий, выделенных из разных районов зал. Петра Великого Японского моря. Полученные результаты показали метал-устойчивость 8 бактерий из 18 тестируемых. Обнаружено разное действие экзометаболитов *H. akashiwo*, культивируемой на тяжелых металлах (ТМ), в отношении бактерий резистентным к данным веществам. Выявлена стимуляция роста условно-патогенных бактерий *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Staphylococcus pasteurii* экзометаболитами. В нескольких случаях зафиксировано снижение численности бактерий *Pseudomonas* sp., при добавлении метаболитов микроводоросли, выращенных с кадмием, свинцом и никелем при 10 и 20 мкг/л, для *Bacillus* sp. при 20 мкг/л свинца, 10 мкг/л и 20 мкг/л кадмия, а также при 50 и 100 мкг/л железа. В итоге наибольшее действие на влияние экзометаболитов в отношении бактерий оказали кадмий, свинец и железо.

Ключевые слова: свинец, кадмий, цинк, железо, микроводоросли, бактерии, экзометаболиты.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-128-138

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом увеличивается поступление ТМ в морские экосистемы. Токсичные соединения попадают в окружающую среду с сельскохозяйственными, городскими и ливневыми стоками, а также с отходами промышленных комплексов (горнодобывающей, металлургической, химической) [1]. Неблагоприятная экологическая ситуация морских вод способствует распространению ТМ в среде и их накоплению в гидробионтах [3]. Концентрация ТМ в одной и той же акватории может значительно различаться, эта зависимость складывается из множества природных факторов, например, перемешивания водных масс, речных стоков, выпадения осадков. Особенностью ТМ является тот факт, что они не разлагаются в результате химических или биологических процессов, а оседают на дно и накапливаются в донных отложениях. Токсич-

ность зависит от того, присутствует ли металл в виде свободного иона в растворе или в составе недиссоциированной соли, а также входит ли элемент в состав органических или неорганических комплексных соединений [4].

Микроорганизмы являются неотъемлемыми компонентами экосистем, которые чувствительны к загрязнению ТМ [7]. Однако некоторые представители способны проявлять высокую устойчивость к ТМ, снижая их концентрацию путем внеклеточного взаимодействия с помощью полимерных веществ, а также аккумуляцией в клеточных органеллах [8]. Следует отметить, что соединения, выделяемые в процессе жизнедеятельности консорциумов – микроводорослей и бактерий, также способны изменять параметры среды [9].

Поскольку антропогенное влияние на морские экосистемы продолжает расти, необходимо понимать, как микробиота реагирует на факторы стресса – тяжелые металлы.

Прибрежные воды Японского моря подвергаются постоянному антропогенному стрессу, который вызывает деятельность, связанную с судоходством и эксплуатацией водного транспорта [2]. На протяжении многих лет проводят мониторинговые работы по изучению химического состава загрязняющих веществ в акваториях Японского моря. На сегодняшний день имеется мало сведений о реакции микробиоты на ТМ в прибрежных районах Японского моря [5, 6].

Огнистая Альбина Васильевна, аспирант.

E-mail: alya_lokshina@mail.ru

Дункай Татьяна Игоревна, аспирант.

E-mail: tdunkai@yandex.ru

Тананаев Иван Гундарович, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор департамента ядерных технологий Дальневосточного Федерального университета. E-mail: geokhi@mail.ru

Маркина Жанна Васильевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории клеточных технологий. E-mail: zhannav@mail.ru

В дальневосточных морях водоросль *Heterosigma akashiwo* имеет конкурентное преимущество перед другими организмами, позволяя колонизировать морские прибрежные экосистемы [11]. Этот вид способен продуцировать цитотоксические соединения, которые приводят к массовой гибели гидробионтов, чаще всего рыб. Считается, что увеличение случаев опасных цветений *H. akashiwo* может возникать вследствие постоянного антропогенного воздействия [12].

Цель работы – оценить влияние ТМ (свинца, кадмия, никеля, цинка и железа) в лабораторных условиях на свойства экзометаболитов микроводоросли *Heterosigma akashiwo* в отношении бактерий, выделенных из разных акваторий Японского моря.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Альгологические методы. Объектом исследования послужила культура *Heterosigma akashiwo*, MBRU_HAK-SR11 (Y. Nada) Y. Nada ex Y. Hara, M. Chihara (Raphidophyceae), предоставленная ЦКП “Морской биобанк” ННЦМБ ДВО РАН (<http://marbank.dvo.ru>). Водоросли выращивали на среде *f* [13], приготовленной на основе стерилизованной морской воды соленостью 32‰ в 250-мл колбах Эрленмейера с объемом питательной среды 100 мл, при температуре 18°C, интенсивности освещения 70 ммоль/м²/с в области видимого света и периоде между светом и темнотой 14 ч свет: 10 ч темнота. В качестве инокулята использовали культуры на стадии экспоненциального роста.

Исследуемые концентрации Cd²⁺, Ni²⁺ и Pb²⁺ составляли: 10 и 20 мкг/л, Zn²⁺, Fe³⁺ – 50 и 100 мкг/л. Выбор концентраций основан на содержании данных металлов в прибрежных водах России и их предельно допустимых концентрациях (ПДК и 2ПДК) [5, 6]. Cd²⁺ добавляли в виде 3CdSO₄ × 8H₂O, Ni²⁺ – NiSO₄ × 7H₂O, Pb²⁺ – PbCl₂, Zn²⁺ – ZnSO₄ × 7H₂O, Fe³⁺ – FeCl₃ × 6H₂O с пересчетом на ионы металла.

Экзометаболиты микроводоросли получали по методике Ли (1987) в модификации Хашими (2016) с небольшими дополнениями [14, 15]. В конические пробирки вносили культуры, взятые на переходе из экспоненциальной фазы роста в стационарную. Суспензию микроводорослей концентрировали центрифугированием на Allegra 64 Rv течение 15 минут, со скоростью 4000 об/мин, в несколько этапов до полной чистоты супернатанта. Надосадочную жидкость собирали и пропускали через фильтры (диаметр пор 0,2 мкм). Полученный раствор добавляли к среде для культивирования бактерий.

Бактериологические методы. Для исследования влияния ТМ совместно с экзосмета-

билитами микроводорослей использовались культивируемые гетеротрофные бактерии, выделенные из поверхностных вод Японского моря лабораторией морской микробиологии кафедры биоразнообразия морских биоресурсов Института Мирового океана Дальневосточного федерального университета – *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Actinomyces* sp., *Escherichia* sp., *Vibrio* sp. (место выделения бух. Золотой пор), *Actinomyces* sp., *Bacillus* sp., *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Pseudomonas* sp., (бух. Новик), *Actinomyces* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Escherichia coli* (бух. Аякс), *Staphylococcus pasteurii*, *Vibrio* sp., *Bacillus* sp., *Escherichia* sp. (зал. Находка). Для изучения метал-аккумулирующих способностей морских бактерий применяли метод Бузолевой (2011) с небольшими модификациями. Посев чистых культур бактерий × 10⁹кл/мл проводили на среду для морских микроорганизмов (СММ) секторным методом с добавлением, в качестве селективных добавок, солей металлов. Учет вели по выявлению роста в секторной зоне. Если наблюдался рост, то культура устойчива к металлу, если рост не обнаружен, то культура чувствительна к токсиканту [3].

Динамику роста бактерий с экзосметаболическими и без них исследовали с 1 по 5 сутки при температуре 37°C. Оценку роста проводили измерением оптической плотности с помощью микропланшетного ридера SPARK 10M (TECAN) при длине волны 540 нм. Определение жизнеспособности бактерий осуществляли посредством высева на чашки Петри со средой СММ [16, 17]. За контроль принимали бактерии, выросшие без добавления метаболитов.

Статистический анализ. Эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку выполняли с помощью программы Excel. На графиках представлены средние значения и стандартные отклонения. Бары на графиках представляют стандартное отклонение измеряемых величин. Достоверность различий между выборками оценивали по критерию Манна-Уитни при уровне значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рост колоний бактерий на селективной среде с добавками ТМ, говорит о их устойчивости к данным веществам, которая появилась в результате длительного влияния металлов на микробиоту. Известно, что многие микроорганизмы проявляют резистентность к ТМ в водной среде. Металлы включены в окислительно-восстановительные реакции, для стабилизации молекул за счет электростатических взаимодействий, в качестве компонентов различных ферментов и для регуляции осмотического давления [18].

Микроорганизмы приспособились к присутствию как эссенциальных, так и неэссенциальных металлов, выработав различные механизмы устойчивости [19].

В результате наших экспериментов обнаружено влияние ТМ на бактерии, которое выразилось в подавлении роста 11 штаммов и проявлении устойчивости 8 штаммов (табл. 1). Отсюда

следует, что наиболее загрязненными районами являлись зал. Находка и бух. Золотой Рог, где было выявлено наибольшее число бактерий, приобретенных устойчивостью к ТМ (табл. 1).

Свинец

В результате проведенных исследований обнаружено, что свинец изменял свойства экзосме-

Таблица 1. Влияние тяжелых металлов на рост морских бактерий

Место выделения	Наименование бактериального штамма	Рост бактерий									
		Cd ²⁺ мкг/л		Ni ²⁺ мкг/л		Pb ²⁺ мкг/л		Zn ²⁺ мкг/л		Fe ³⁺ мкг/л	
		10	20	10	20	10	20	50	100	50	100
Бух. Аякс	<i>Actinomyces</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
	<i>Pseudomonas</i> sp.	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Bacillus</i> sp.	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
	<i>Escherichia coli</i>	+	+	OP	OP	+	+	OP	+	OP	OP
Бух. Новик	<i>Actinomyces</i> sp.	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-
	<i>Bacillus</i> sp.	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Vibrio</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Escherichia</i> sp.	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+
	<i>Pseudomonas</i> sp.	OP	OP	OP	+	+	+	OP	OP	+	+
Зал. Находка	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	OP	OP	+	OP	+	OP	OP	+	OP	OP
	<i>Vibrio</i> sp.	+	OP	OP	OP	OP	+	+	OP	OP	
	<i>Actinomyces</i> sp.	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Bacillus</i> sp.	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+
	<i>Escherichia</i> sp.	OP	OP	+	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP
Бух. Золотой Рог	<i>Staphylococcus lentus</i>	+	OP	OP	+	+	OP	+	+	OP	OP
	<i>Enterococcus</i> sp.	+	+	OP	OP	+	+	+	OP	OP	+
	<i>Escherichia</i> sp.	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-
	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP
	<i>Actinomyces</i> sp.	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-

Примечание: «OP» – обильный рост, «+» – оптимальный рост бактерий, «-» – отсутствие бактериального роста

таболитов микроводоросли *H. akashiwo* в отношении бактерий (рис.1). Выявлена стимуляция роста *Vibrio sp.*, *Escherichia sp.*, *Staphylococcus lentus*. Экзометаболиты, полученные от *H. akashiwo*, выращенной при концентрации 20 мкг/л свинца, вызвали усиленный рост *Vibrio sp.*, *Escherichia sp.* (рис. 1). Ранее также показано, что свинец способствовал стимулированию роста бактерий из рода *Escherichia*, однако процесс зависел от множества факторов [20].

Противоположный эффект зарегистрирован в отношении *Pseudomonas sp.*, *Enterococcus sp.*, и *Bacillus sp.*, где наблюдалось подавление роста. Экзометаболиты, культивируемые при 20 мкг/л свинца, ингибировали *Enterococcus sp.*, и *Bacillus sp.* В концентрации 10 мкг/л свинца снижение ростовых показателей было характерно только для *Pseudomonas sp.* (см. рис. 1). Известно, что свинец губительно действовал на морфологию, метаболизм и рост *Acidithiobacillus ferroxidans*, *Acidithiobacillus thioxidans*, *Leptospirillum ferriphilum* и *Leptospirillum ferroxidans*, *Sulfobacillus acidophilus*, *Sulfolobus metallicus*, влияя на изменение структуры нуклеиновых кислот, вызывая разрушение клеточных мембран, ингибирование активности ферментов и окислительное фосфорилирование [21, 22]. Под влиянием свинцового загрязнения установлено изменение биохимической активности бацилл. Выявлено снижение активности таких ферментов, как протеаза, амилаза, нитратредуктаза, а также снижение аммонифицирующей способности и образования нитратов по мере увеличения свинцового стресса [8, 23].

В отношении бактерий *Escherichia coli*, *Staphylococcus pasteurii* и *Bacillus sp.*, (при 10 мкг/л) метаболиты *H. akashiwo*, культивируемые совместно со свинцом, влияния не оказали (рис. 1).

Свинец способен как стимулировать роста микроводорослей, так и подавлять в результате нарушения физиологических процессов

[24]. У некоторых представителей водорослей при токсическом воздействии увеличивалось содержание ряда веществ в клетках – липидов [25], полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) [26, 27], полифенолов, флавоноидов, пигментов [28]. В низких концентрациях свинец, оказывал стимулирующее действие на рост *Dunaliella tertiolecta* [29] и *Monoraphidium minutum* [30]. Таким образом, можно предположить, что свинец приводит к изменению метаболизма микроводорослей.

Кадмий

Экзометаболиты *H. akashiwo*, полученные в результате культивирования с разными концентрациями кадмия, проявляли стимулирующее действие в отношении пяти бактерий. Следует отметить, что 10 мкг/л вызвало наибольшее усиление роста *Vibrio sp.*, *S. lentus*, *Enterococcus sp.*, *S. pasteurii*. При добавлении 20 мкг/л кадмия можно выделить единичный случай стимуляции для *E.coli* (рис. 2). Подобный способ усиления роста микроорганизмов при небольших концентрациях токсиканта назвали эффектом Арндт-Шульца. Суть заключается в том, что токсикант аккумулируясь на поверхности клетки, меняет проницаемость клеточной стенки, что, в свою очередь, определяет свободное прохождение питательных веществ [4]. Например, кадмий в концентрации 20 мг/л стимулировал рост *Lactobacillus acidophilus*, а при концентрации 40 мг/л угнетал развитие бактерий. Несколько ученых исследовали действие кадмия на *E. coli* и обнаружили, что чем выше концентрация токсиканта, тем сильнее его влияние, приводящее к повреждению ДНК, денатурации белка и ингибированию процесса клеточного деления [31]. Однако концентрации кадмия более 20 и 40 мг/л значительно увеличивали численность *Proteobacteria* и *Gemmatimonas* [32]. Исследователи из Китая обнаружили, что бактерии

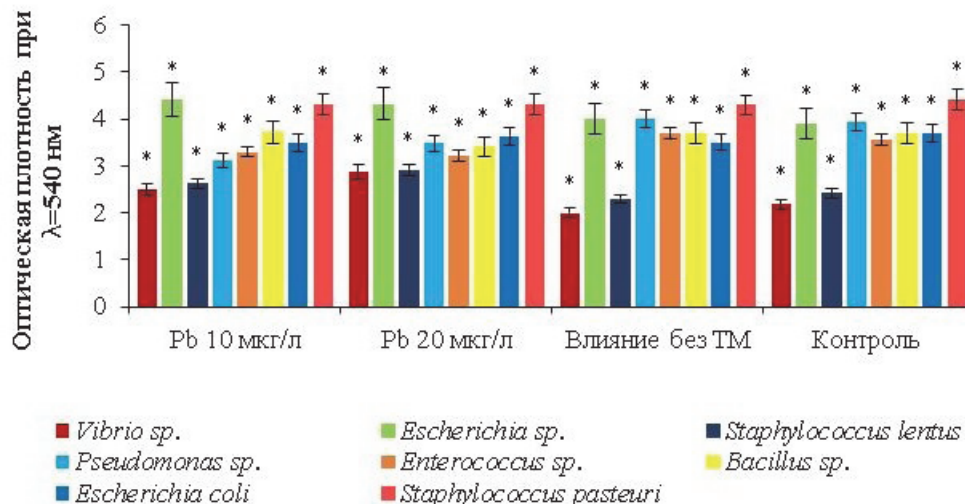


Рис. 1. Влияние свинца на свойства экзометаболитов *Heterosigma akashiwo* в отношении бактерий

устойчивые к кадмию вытесняли другие виды микроорганизмов, и в результате, становились доминирующей группой [33]. Зенг с соавторами (Zeng et al., 2005) зафиксировали негативный эффект кадмия, который проявлялся в снижении структуры и биоразнообразия микробного сообщества [34].

Внесение метаболитов, полученных от *H. akashiwo*, культивируемой в 10 мкг/л и 20 мкг/л кадмия показало подавление роста *Bacillus* sp. (рис. 2). Подобный эффект отмечен ранее на *Bacillus thermoamylovorans* и *Bacillus foraminis*, где внесение кадмия значительно тормозило их рост [35]. В других экспериментах обнаружено, что вышеуказанный металл снижал численность и подавлял биопленкообразование *Bacillus subtilis* [4].

Следует отметить, что метаболиты микроводоросли не оказывали влияние на *E. coli* (при 10 мкг/л), *Escherichia* sp., *Pseudomonas* sp. (рис. 2). Бактерии могли обладать восстановительными свойствами к кадмию. Например, Суксаби с соавторами (Suksabyeetal., 2016) сообщили, что добавление *Pseudomonas aeruginosa* уменьшало количество кадмия в зернах риса, полученных из почвы, загрязненной металлом. Авторы предполагали, что *P. aeruginosa* имела свойства, которые позволили восстанавливать кадмий и выводить из зерна [36].

Кадмий также оказывал влияние на микроводоросли. Его добавление в малых концентрациях к *Thalassiosira weissflogii* приводило к стимуляции роста и активности карбоангидразы. В случае *Chlorella minutissima* наблюдалось увеличение липидной продуктивности, а концентрации до 10 мг/л повышали значения хлорофилла *a* в культурах *Scenedesmus quadricauda* и *Pseudochlorococum tyricum*. Эти данные свидетельствуют о том, что кадмий способен оказывать воздействие на обмен веществ микроводорослей, а также изменять активность экзометаболитов *H. akashiwo* при взаимодействии с бактериями [27]. Следует отметить, что

стимуляция экзометаболитами происходила только в отношении условно-патогенных бактерий. Известно, что вышеупомянутый металл снижал количество видов и изменял видовой состав микробного сообщества. Бактерии устойчивые к кадмию становились доминирующими в той или иной экосистеме [33]. В зависимости от условий среды обитания микроорганизмы могли изменять свои биологические свойства, в том числе вирулентность [37].

Никель

Культивирование микроводоросли совместно с разными концентрациями никеля оказывали действие на свойства экзометаболитов в отношении трех бактерий – *Escherichia* sp., *E. coli* и *Pseudomonas* sp. Выявлен усиленный рост *Escherichia* sp., который особенно проявлялся при 10 мкг/л, а для *E. coli* при 20 мкг/л никеля (рис. 3). Ученые Чикагского университета сообщили, что *E. coli* нуждалась в активности никельсодержащей гидрогеназы для оптимального роста. Дефицит никеля приводил к замедлению ферментативного роста данной бактерии. Добавление 300 мкМ металла в питательную среду восстанавливало активность гидрогеназы, что способствовало стимуляции *E. Coli* [38]. На данный момент времени известны механизмы устойчивости бактерий к никелю [39]. Этот металл способен связываться с экзометаболитами микроорганизмов, образуя нерастворимые комплексы солей, а также может взаимодействовать с поверхностью клеточной стенки и накапливаться в ней [40]. Исследователи обнаружили, что наиболее значимыми компонентами, связанными с вирулентностью бактерий, являются никельсодержащие ферменты гидрогеназы и уреазы [41].

Зарегистрировано ингибирование роста *Pseudomonas* sp., в обеих концентрациях никеля, но при 10 мкг/л подавление было более сильное (см. рис. 3). Подобный эффект наблюдался при

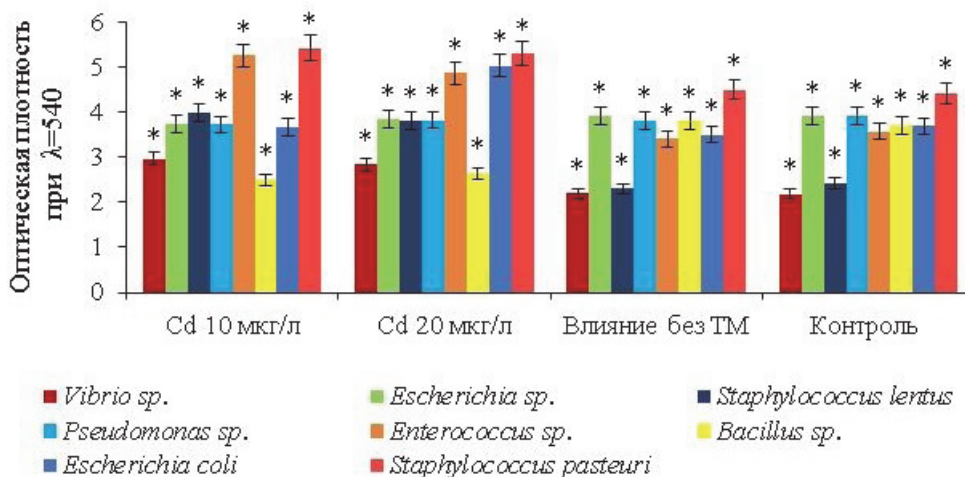


Рис. 2. Влияние кадмия на экзометаболиты *Heterosigma akashiwo* при взаимодействии с бактериями

тестировании способности *Klebsiella oxytoca* к биоудалению никеля, где также оценивали рост бактерий. Результаты показали, что присутствие металла в культуральной среде ингибировало скорость роста бактерии по сравнению с контролем [42]. Ингибирующее действие вышеупомянутого металла также выявлено в экспериментах, проводимых на *Acidithiobacillus* [43]. Авторы объясняли снижение роста тем, что бактерии, оказавшиеся в условиях стресса, использовали энергию, предназначенную для роста, на поддержание других функций, поскольку для выработки резистентности к металлу требуется больше энергии [44].

Остальные бактерии, тестируемые в работе, не подвергались действию экзометаболитов, полученных из водоросли, выращенной совместно с никелем (рис. 3). Микроорганизмы *Staphylococcus* sp., и *Bacillus* sp., которые были устойчивы к экзометаболизму, культивируемые в присутствии никеля, также проявили резистентность в экспериментах других ученых [45]. Индийские исследователи выделили устойчивую к никелю *Cupriavidus* sp., при (1,0-10,0 мМ). Авторы предположили, что резистентность может быть обусловлена внецитоплазматическим связыванием и накоплением в сочетании с экспрессией специфических периплазматических белков [46].

Никель является важным металлом для морских микроводорослей. Он служит кофактором в ферменте уреазе, но в больших концентрациях он подавляет рост диатомовых водорослей [27]. Металл влияет на метаболизм микроводорослей в концентрации 0,5 мг/л, вызывает сдвиг профиля жирных кислот в сторону насыщенных в клетках *Dunaliella salina* и *Nannochloropsis salina* [47]. Точно так же небольшие концентрации Ni (0,1–10 мкМ) приводили к увеличению содержания хлорофилла *a* и продукции с-фикоцианина в культуре *Anabaena doliolum* [48].

Как показано в литературе, никельсодержащие ферменты играли важную роль в вирулентности патогенов, поэтому его небольшие концентрации могли приводить к стимуляции бактериального роста [41].

Цинк

Результаты исследований продемонстрировали влияние цинка на свойства экзометаболитов *H. akashiwo* в обеих концентрациях, которые стимулировали рост *Vibrio* sp. и *Enterococcus* sp. (рис. 4). Обнаружено, что чем выше концентрация, тем интенсивнее рост бактерий. Похожая реакция наблюдалась у клубеньковых бактерий, где при добавлении металла в концентрации 0,01% происходила стимуляция роста *Rhizobium meliloti*. При сравнении действия ТМ – меди, кадмия, свинца, только цинк приводил к угнетению роста *R. meliloti* [49].

Экзометаболиты, полученные из водоросли, культивируемой с разными концентрациями цинка, не проявили активности в отношении шести бактерий, тестируемых в работе (см. рис. 4). Цинк является важным элементом в качестве кофактора ключевых ферментов и белков, участвующих во многих процессах, таких как репликация ДНК, синтез и обмен белков. Также была обнаружена резистентность в отношении нитрата цинка у бацилл *Bacillus cereus*, сульфата цинка – *B. subtilis*, ацетата цинка и хлорида цинка – *B. cereus* [50]. Клинические штаммы *Staphylococcus aureus* и *P. aeruginosa* показали устойчивость к наночастицам цинка в концентрациях 0,001–0,1 мг/мл [51]. Ученые из Франции продемонстрировали слабое влияние металла на разнообразие бактерий, авторы объясняли это адсорбцией или его включением в небiodоступную фракцию. Тем не менее, наличие цинка в среде приводило к значительным изменениям в циклах питательных веществ [52].

Показано участие ионов токсиканта в различных бактериальных патогенезах. Более того,

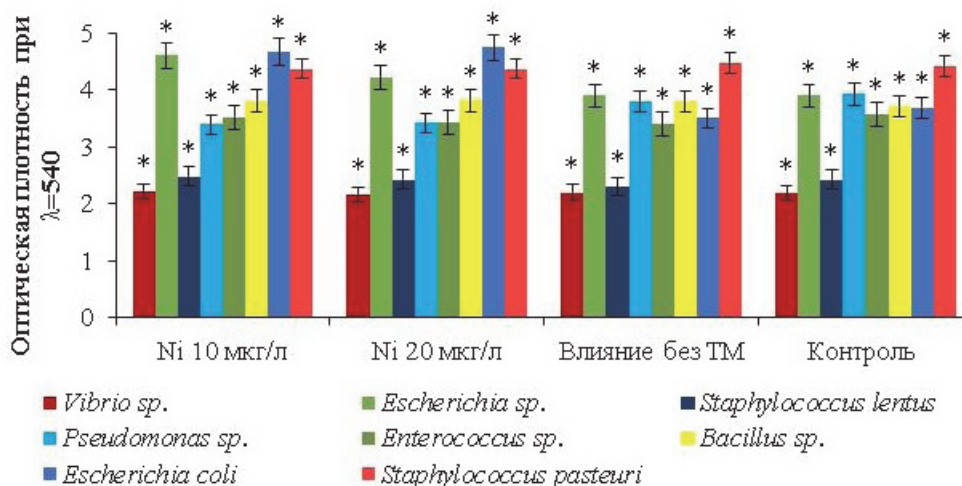


Рис. 3. Влияние никеля на экзометаболиты *Heterosigma akashiwo* при взаимодействии с бактериями

появляется все больше доказательств важности цинка в вирулентности различных бактерий. Цинк участвует в формировании биопленки, подвижности бактерий, устойчивости к антибиотикам и выживании в условиях окислительного стресса. Поэтому, способность клеток поддерживать гомеостаз цинка имеет решающее значение для их роста, выживания и вирулентности [53].

Таким образом, стимулирующее воздействие экзометаболитов *H. akashiwo* на *Vibrio* sp., и *Enterococcus* sp., можно объяснить влиянием цинка на метаболизм микроводоросли. Известно, что внесение низких концентраций токсиканта ускоряло рост *D. tertiolecta* [54] и повышало содержание хлорофилла *a*. При различных концентрациях тенденция содержания хлорофилла была соответствующей таковой для роста, но более низкие концентрации чаще всего вызывали значительное увеличение (хлорофилла *a* и хлорофилла *b*) у зеленых водорослей *Chlorella vulgaris* и *Scenedesmus bijuga*, в то время как более высокие концентрации вещества снижали содержание пигментов. Низкие концентрации цинка стимулировали продукцию жирных кислот *D. tertiolecta* [54]. Несколько исследователей показали, что накопление продуктов метаболизма может быть одним из способов, с помощью которых водоросли способны ликвидировать токсическое действие ТМ [55, 56, 57].

Железо

Экзометаболиты *H. akashiwo*, полученные в результате культивирования с разными концентрациями железа, проявляли стимулирующее действие в отношении трех бактерий – *E. coli*, *S. lentus*, *S. pasteurii*. Следует отметить, что 50 мкг/л токсиканта активнее работало в отношении *E. coli*, 100 мкг/л в случае *S. lentus*, а для *S. Pasteurii* 50 и 100 мкг/л железа (рис. 5). Из литературы известно, что многим бактериям необходим этот

металл, они могут его восстанавливать или окислять для получения энергии, а также при понижении pH запасать. Осаждение железа может происходить посредством сорбции ионов на поверхности бактериальной клетки [58]. Для *E. coli* учёные подсчитали, что более 90% клеточного железа задействовано для функционирования дыхательной цепи [59]. Вышеуказанный металл усиливал как рост, так и экспрессию факторов вирулентности бактерии *Pseudomonas syringae*. Состояние обогащения железом составляло около 200 мкМ, а проявление токсичных свойств начиналось при концентрации более 400 мкМ. Токсичность проявлялась в следствие катализирования реакции Фентона с дальнейшим образованием высоко реакционноспособного гидроксильного радикала, который мог вызывать повреждение мембран бактериальных клеток [60]. Сообщалось об изменениях в реакции бактерий на железо, что отражалось в снижении альфа-разнообразия *Roseobacter*, *Gammaproteobacteria* и *Cytophaga-Flavobacterium* [61].

Было отмечено ингибирование *Bacillus* sp., наибольшая активность выражалась при 50 мкг/л токсиканта. Для остальных бактерий влияние метаболитов не зарегистрировано (см. рис. 5). Ранее показано, что железо оказывало ингибирующее действие на представителей нормальной микрофлоры кишечника [62]. Ограничение железа в среде у двух бактериальных штаммов *Alteromonas macleodii*, изолированных из прибрежной морской зоны, приводило к снижению роста, дыхания, изменению в экспрессии нескольких ключевых ферментов, связанных с катаболизмом углерода, особенно тех, кто участвовал в цикле лимонной кислоты, гликолизе и окислительном фосфорилировании [62].

Для нормального роста и метаболизма микроводорослей железо является жизненно важным элементом. Оно требуется для поддержания фотосинтеза и других метаболических реакций.

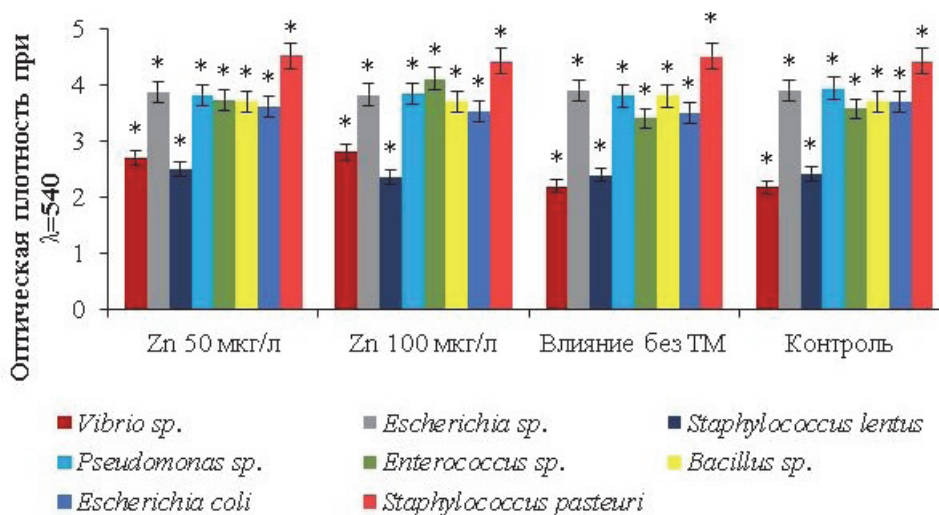


Рис. 4. Влияние цинка на экзометаболиты *Heterosigmaakashiiwo* при взаимодействии с бактериями

Большое количество исследований показало, что металл оказывал стимулирующее действие на рост микроводорослей *Chlamydomonas reinhardtii* [63, 65], приводил к увеличению содержания липидов, к примеру в морском штамме *S. vulgaris* [64], а также у пресноводных *Botryococcus* sp., и *Scenedesmus obliquus* [66, 67], содержание жирных кислот у *P. tricornutum* [68] у *Arthrospira platensis* увеличение пальмитиновой, олеиновой, линолевой, γ -линоленовой и докозагексаеновой кислот [69]. Самая высокая скорость роста клеток *D. tertiolecta* зафиксирована при использовании сульфата железа и аммония [70]. Отсюда следует, что действие экзометаболитов *H. akashiwo* на бактерии можно объяснить влиянием железа на метаболизм микроводоросли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе установлено, что под действием ТМ экзометаболиты, выделяемые в процессе жизнедеятельности микроводоросли *Heterosigma akashiwo* меняли свою активность в отношении партнеров по сообществу – бактерий (рис. 6).

Экзометаболиты *H. akashiwo*, вступившие в реакцию с ТМ, приводили к значительным нарушениям в структурно-функциональных показателях биоценозов, что проявлялось в увеличении численности условно-патогенных бактерий – *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Staphylococcus pasteurii*, чрезмерное размножение которых ведет к развитию заболеваний у гидробионтов, вытесняя виды убиквисты – *Pseudomonas* sp. и *Bacillus* sp.

В результате наших исследований, были выделены наиболее загрязненные районы зал. Петра Великого – зал. Находка и бух. Золотой Рог. В этих районах были обнаружены бактерии устойчивые к ТМ, а также зафиксировано изменение

свойств экзометаболитов *H. akashiwo* под действием ТМ в отношении бактерий. Наибольшее влияние на активность экзометаболитов оказывали – кадмий, свинец и железо, наименьшее – никель и цинк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis A., Shokouhian M., Shubei N. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources // *Chemosphere*. 2001. № 44. P. 997-1009.
2. Христофорова, Н.К. Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря: монография / ответственный редактор: Н. К. Христофорова. Дальневосточный федеральный университет. – Владивосток, 2012. - 440 с.
3. Бузолева, Л.С. Микробиологическая оценка качества природных вод, летняя учебно-полевая практика: учеб. пособ. / Л.С. Бузолева. - Владивосток, 2011. - 88 с.
4. Воронин, Е.С. Ветеринарная биология и иммунология / Е.С. Воронин, В.Н. Колесник, Н.М. Колычев // Электронный дидактический комплекс. - М., 2006. - URL: <https://nsau.edu.ru/images/vetfac/images/ebooks/microbiology/stu/bacter/ecologia/toksbaht.htm> (дата обращения 25.01.2023).
5. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2021. М.: Наука, 2022. - 230 с.
6. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2019 [Под ред. Коршенко А.Н.]. - М.: Наука, 2020. - 232 с.
7. Ramanan R., Kim B.H., Cho D.H. Algae-bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications // *Biotechnology Advances*. 2016.Vol. 34. Is 1. P. 14-29.
8. Фокина, А.И. Тяжёлые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор) / А.И. Фокина, Т.Я. Ашихмина, Л.И. Домрачева, Е.А. Горностаева // Теоретическая и прикладная экология. - 2015. - №2. - С. 5-18.
9. Капков, В.И. Использование морских одноклеточных водорослей в биологическом мониторинге / В.И. Капков, Е.В. Шошина, О.А. Беленикина // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2017. - № 20(2). - С. 308-315.
10. Growth response of six strains of *Heterosigma akashiwo* to varying temperature, salinity and irradiance conditions / R. Martínez, E. Orive, A.S. Laza-Martínez Seoane // *J. Plankton Res.* 2010. № 32. P. 529-538.
11. Broad salinity tolerance as a refuge from predation in the harmful raphidophyte alga *Heterosigma akashiwo*

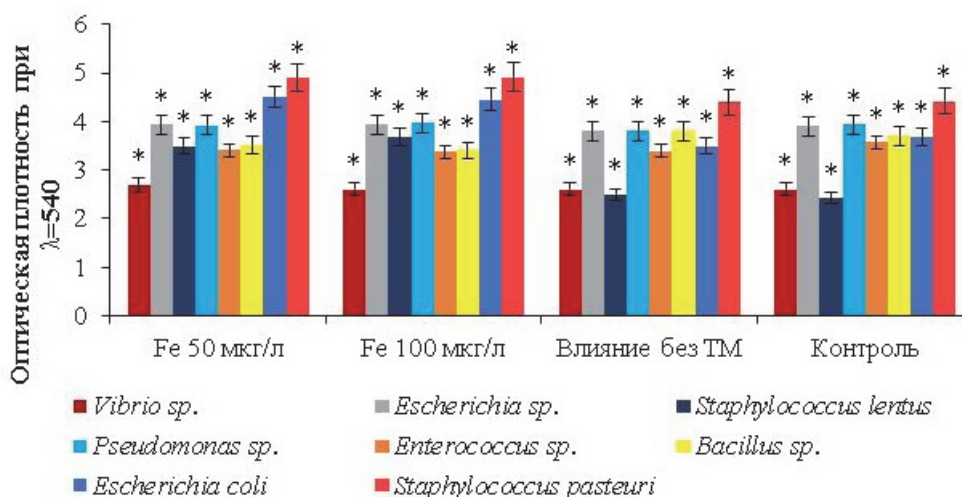


Рис. 5. Влияние железа на экзометаболиты *Heterosigma akashiwo* при взаимодействии с бактериями

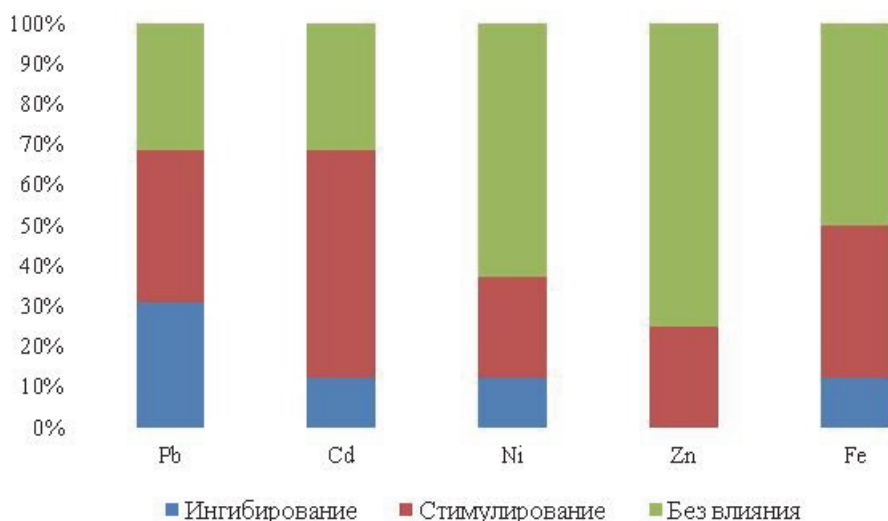


Рис. 6. Влияние тяжелых металлов на действие экзометаболитов *H. akashiwo* в отношении бактерий

- (Raphidophyceae) / S.L. Strom, E.L. Harvey, K.A. Fredrickson, S. Menden-Deuer // J. Phycol. 2013. №49. P. 20-31.
12. Dursun F., Taş S., Koray T. Spring bloom of the raphidophycean *Heterosigma akashiwo* in the golden horn estuary at the northeast of sea of marmara // Ege J. Fish. Aquat. Sci. 2016. Vol. 33. P. 201-207.
 13. Guillard R.R.L., Ryther J.H. Studies of marine planktonic diatoms. 1. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran // Canadian Journal of Microbiology. 1962. Vol. 8. (2). P. 229-239.
 14. Comparison of several methods effective lipid extraction from microalgae / J.Y. Lee, C. Yoo, S.Y. Jun, C.Y. Ahn, H.M. Oh // Bioresour. Technol. 2010. №101. P. 75-77.
 15. The effect of microalgae extraction on bacterial species isolated from seminal fluid of sexually active males in Baghdad / A. Hashimi, N. Shahrazad, R.F. Mansur // J. Genet. Environ. Resour. Conserv. 2016. №4 (2). P. 171-177.
 16. Christensen G.D., Simpson W.A., Younger J.J. Adherence of coagulase-negative staphylococci to plastic tissue culture plates: a quantitative model for the adherence of staphylococci to medical devices // J Clin. Microbiology. 1985. №22 (6). P. 996-1006.
 17. O'Toole G.A., Kolter R. Initiation of biofilm formation in *Pseudomonas fluorescens* WCS365 proceeds via multiple, convergent signalling pathways: a genetic analysis // Molecular Microbiology. 1998. Vol. 28. №3. P. 449-461.
 18. Bruins M.R., Kapil S., Oehme F.W. Microbial resistance to metals in the environment // Ecotoxicol Environ Saf. 2000. Vol. 45 (3). P. 198-207.
 19. Безвербная, И.П. Отклик микроорганизмов прибрежных акваторий Приморья на присутствие в среде тяжелых металлов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук / И.П. Безвербная. - Владивосток, 2002. - 18 с.
 20. Kumar M., Upreti R.K. Impact of lead stress and adaptation in *Escherichia coli* // Ecotoxicology and environmental safety. 2000. Vol. 47. Is. 3. P. 246-252.
 21. Fashola M.O., Ngole-Jeme V.M., Babalola O.O. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance // International journal of environmental research and public health. 2016. Vol. 13. №11. 1047 p.
 22. Bissen M., Frimmel F. Arsenic—a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility // Acta hydrochimica et hydrobiologica. 2003. Vol. 31. №1. P. 9-18.
 23. Довлетярова, Э.А. Изменение биохимической активности бактерий под влиянием свинцового загрязнения дерново-подзолистой почвы / Э.А. Довлетярова // Докл. ТСХА (Московская с.х. акад. им. Тимирязева). - 2004. - № 276. - С. 342-346.
 24. Сысоев, А.А. Влияние ионов свинца и РОВ на рост, развитие и аденилатный энергетический заряд микроводорослей в культурах / А.А. Сысоев, И.В. Сысоева // Вопросы современной альгологии. - 2017. - № 1(13). - 24 с.
 25. Impact of heavy metals from flue gas integration with microalgae production / K. Napan, L. Teng, J.C. Quinn, B.D. Wood // Algal Res. 2015. №8. P. 83-88.
 26. Gopalakrishnan V., Ramamurthy D. Dyeing industry effluent system as lipid production medium of *Neochloris* sp. for biodiesel feedstock preparation // Biomed. Res. Int. 2014. P. 529-560.
 27. Effect of metals, metalloids and metallic nanoparticles on microalgae growth and industrial product biosynthesis: A Review / K. Miazek, W. Iwanek, C. Remacle, A. Richel, D. Goffin // Int J Mol Sci. 2015. Vol. 16 (10). P. 23929-69.
 28. Secondary metabolites production combined with lead bioremediation by *Halamphora* sp. marine diatom microalgae and their physiological response / D.B.I. Moussa, S. Boukhriss, K. Athmouni, H. Ayadi // Int J Aquac Fish Sci. 2022. № 8 (2). P. 025-036.
 29. Tripathi V.N., Strivastova S. Ni²⁺-uptake in *Pseudomonas putida* strain S4: A possible role of Mg²⁺-uptake pump // J. Biosci. 2006. Vol. 31. № 1. P. 61-67.
 30. Paperi R., Micheletti E., Phillppis R. Optimizatiuon of copper sorbing-desorbing cycles with confined cultures of the exopolysaccharide-producing cyanobacterium *Cyanospiracapsulatan* // J. Appl. Microbiol. 2006. Vol. 101. № 6. P. 1351-1356.
 31. Thomas M., Benov L. The contribution of superoxide radical to cadmium toxicity in *E. coli* // Biol. Trace Elem. Res. 2018. №181. P. 361-368.
 32. Cadmium pollution impact on the bacterial community structure of arable soil and the isolation of the cadmium resistant bacteria / Y. Xiaoxia, Z.J. Tong, L. Xiaoqing, S.L. Xin // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. P. 1664-302X.
 33. Ecological responses of bacterial assembly and functions to steep Cd gradient in a typical Cd-contaminated farmland ecosystem / Y. Deng, S.D. Fu, E.K. Sarkodie, S.F. Zhang // Ecotoxicol Environ Saf. 2022. №229. 113067 p.
 34. Effects of Cd contamination on paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices / L. Zeng, M. Liao, C. Huang, Y. Luo // Biodivers Sci. 2005. №13(6). P. 555-65.
 35. Peng Y., Xiaojie L., Jinhua L. Effects of cadmium stress on microbial community diversity in soil potted with *sasa argentea striatus* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 300 p.
 36. Effect of biochars and microorganisms on

- cadmium accumulation in rice grains grown in Cd-contaminated soil / P. Suksabye, A. Pimthong, P. Dhurakit, P. Mekvichitsaeng, P. Thiravetyan // Environ. Sci. Pollut. Res. 2016. №23. P. 962-973.
37. Сомов, Г.П. Адаптация патогенных бактерий к абиотическим факторам окружающей среды / Г. П. Сомов, Л. С. Бузолева. - Рос. акад. мед. наук. Сиб. отд-ние, НИИ эпидемиологии и микробиологии. - Владивосток: Примполиграфкомб., 2004. - 167 с.
 38. Effect of nickel on the fermentative growth of *Escherichia coli* k-12 and comparison of nickel and cobalt toxicity on the aerobic and anaerobic growth / L.F. Wu, C. Navarro, K. Pina, M. Quénard, M.A. Mandrand // Environmental health perspectives. 1994. Vol. 102. P. 297-300.
 39. Hausinger R.P., Zamble D.B. Microbial physiology of nickel and cobalt // Molecular microbiology of heavy metals / Eds. Nies Springer-Verlag. 2007. P. 287-320.
 40. Comparative genomics of regulation of heavy metal resistance in Eubacteria / E.A. Permina, A.E. Kazakov, O.V. Kalinina, M.S. Gelfand // BMC Microbiol. 2006. Vol. 6. P. 49-60.
 41. Maier R.J., Benoit S.L. Role of nickel in microbial pathogenesis // Inorganics. 2019. Vol. 7(7). 80p.
 42. Alboghobeish H., Tahmourespour A., Doudi M. The study of nickel resistant bacteria (NiRB) isolated from wastewaters polluted with different industrial sources // J Environ Health Sci Eng. 2014. Vol.12(1). 44 p.
 43. Ахметов, Л.И. Токсичность никеля для тионовых бактерий / Л.И. Ахметов, А.Г. Быков, М.Б. Вайнштейн, Т.З. Есикова, А.Е.Филонов, Л.Н. Крылова, С. Моргазави // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. - 2010. - Vol. (1). - P. 167-174.
 44. Hernandez B., Dorian A. Zinc and lead biosorption by *Delftia suruhatensis*: a bacterial strain resistant to metals isolated from mine tailings // J water Resource Protec. 2012. №4. P. 1-11.
 45. Rajbanshi A. Study on heavy metal resistant bacteria is Guhewori sewage treatment plant // J our nature. 2008. №6. P. 52-57.
 46. Arundhati P., Paul A.K. Nickel uptake and intracellular localization in *Cupriavidus pauculus* 201 // Adv biosciotechnol. 2010. №1. P. 276-280.
 47. Mohammady N.G., Fathy A.A. Humic acid mitigates viability reduction, lipids and fatty acids of *Dunaliella salina* and *Nannochloropsis salina* grown under nickel stress // Int. J. Bot. 2007. №3. P. 64-70.
 48. Responses of cyanobacterium *Anabaena doliolum* during nickel stress / M.K. Shukla, R.D. Tripathi, N. Sharma, S. Dwivedi, S. Mishra, R. Singh, O.P. Shukla, U.N. Rai // J. Environ. Biol. 2009. №30. P. 871-876.
 49. In vitro test of inhibition effect of extracts from three seaweed species distributed at Black Sea on different pathogens potentially dangerous for aquaponics / I. Sirakov, K. Velichkova, N. Rusenova, T. Dinev // Biotechnol Lett. 2019. Vol. 24 (1). P. 176-183.
 50. Ознобихина, А.О. Модельное биотестирование влияния солей тяжёлых металлов на жизнеспособность клубеньковых бактерий *Rhizobium meliloti* / А.О. Ознобихина, А.Ю. Першаков, Д.И. Ерёмин // Самарский научный вестник. - 2019. - Т. 8, - № 3 (28). - С. 69-72.
 51. Королькова, Д.С. Определение минимальных подавляющих концентраций солей цинка на рост пробиотических штаммов бактерий рода *Bacillus* / Д.С. Королькова, М.Л. Русяева, И.В. Коробова // Международный студенческий научный вестник. - 2018. - № 4. - 3 с.
 52. Pringault O., Viret H., Duran R. Interactions between Zn and bacteria in marine tropical coastal sediments // Environmental science and pollution research international. 2011. №19. P.879-92.
 53. Suryawati B. Zinc homeostasis mechanism and its role in bacterial virulence capacity // The 8th annual basic science international conference. AIP Conf. Proc. 2021. P. 070021-1-070021-7.
 54. El-Naggar A.H. Growth and some metabolic activities of *Chlorella* and *Scenedesmus* in relation to heavy metal pollution in Gharbia Governorate // Botany Department, Faculty of Science. 1993. 278 p.
 55. De-Filippis L.E., Hampp R., Ziegler H. The effects of sub-lethal concentrations of zinc, cadmium and mercury on *Euglena* growth and pigments // Pflanzen Physiol. 1981a. №101. P. 37-47.
 56. De-Filippis L.E., Hampp R., Ziegler H. The effects of sub-lethal concentrations of zinc, cadmium and mercury on *Euglena* II. Respiration, photosynthesis and photochemical activities // Arch Microbiol. 1981b. P.128-404.
 57. Rai L.C., Singh A.K., Mallick N. Studies on photosynthesis, the associated electron transport system and some physiological variables of *Chlorella vulgaris* under heavy metal stress // J Plant Physiol. 1991. №137. P. 419-424.
 58. Изучение микроорганизмов, окисляющих железо, для возможного использования в биотехнологии очистки воды / К.Т. Нгун, Д.А. Рагузина, Е.В. Плешакова, М.В. Решетников // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18, № 2. С. 204-210.
 59. Effects of iron limitation on growth and carbon metabolism in oceanic and coastal heterotrophic bacteria / M. Fourquez, A. Devez, A. Schaumann, A. Guéneugues, T. Jouenne // Limnology and Oceanography Bulletin. 2014. №59 (2). P. 349-360.
 60. Effect of iron concentration on the growth rate of *Pseudomonas syringae* and the expression of virulence factors in hrp-inducing minimal medium / B.J. Kim, J.H. Park, T.H. Park, P.A. Bronstein, D.J. Schneider, S.W. Cartinhour, M.L. Shuler // Appl Environ Microbiol. 2009. №75(9). P. 2720-6.
 61. Specific effect of trace metals on marine heterotrophic microbial activity and diversity: key role of iron and zinc and hydrocarbon-degrading bacteria / F. Baltar, A. Gutiérrez-Rodríguez, M. Meyer, I. Skudelny, S. Sander, B. Thomson, S. Nodder, R. Middag, S.E. Morales // Front Microbiol. 2018. №19. 3190 p.
 62. Microstructures and functional groups of *Nannochloropsis* sp. cells with arsenic adsorption and lipid accumulation / J. Cheng, Z. Yang, K. Li, J. Zhou, K. Cen // Bioresour. Technol. 2015. №194. P. 305-311.
 63. Effects of iron limitation on growth and carbon metabolism in oceanic and coastal heterotrophic bacteria / A. Devez, M. Fourquez, S. Blain, I. Obernosterer, A. Schaumann, Guéneugues A., Jouenne T // Limnology and oceanography. 2014. №52. 349 p.
 64. The effect of iron on growth, lipid accumulation, and gene expression profile of the freshwater microalga *Chlorella sorokiniana* // M. Wan, X. Jin, J. Xia, J.N. Rosenberg, G. Yu, Z. Nie // Appl Microbiol Biotechnol. 2014. № 98. P. 9473-9481.
 65. The effect of iron concentration on the growth rate of *Chlamydomonas reinhardtii* / J.C. Seo, J.F. Tang, M.J. Wagstaff // The Expedition. 2013. Vol. 3. P. 9-16.
 66. Yeesang C., Cheirsilp B. Effect of nitrogen, salt, and iron content in the growth medium and light intensity on lipid production by microalgae isolated from freshwater sources in Thailand // Biores Technol. 2011. №102. P. 3034-3040.
 67. Enhancement of lipid accumulation in *Scenedesmus obliquus* by optimizing CO₂ and Fe³⁺ levels for biodiesel production / H.H.A. El-Baky, G.S. E.B. Bouaid, M. Martinez, J. Aracil // Biores Technol. 2012. №119. P. 429-432.
 68. Of iron valence on the growth, photosynthesis, and fatty acid composition of *Phaeodactylum cornutum* / H. Wang, Q. Su, Y. Zhuang, C. Wu, S. Tong, B. Guan, Y. Zhao, H. Qiao // J. Mar. Sci. Eng. 2023. №11. 316 p.
 69. Influence of Fe²⁺ on the biomass, pigments, and essential fatty acids of *Arthrospira platensis* / M.M. El-Sheekh, J.M. Salman, R.A. Grmasha // Biomass Conv. Bioref. 2022.
 70. Rizwan M., Mujtaba G., Lee K. Effects of iron sources on the growth and lipid carbohydrate production of marine microalga *Dunaliella tertiolecta* // Biotechnol Bioproc. 2017. № 22. P. 68-75.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAVY METALS ON THE MICROBIOCENOSIS
OF PETER THE GREAT BAY OF THE SEA OF JAPAN ON THE EXAMPLE OF MICROALGAE
AND BACTERIA UNDER THE CONDITIONS OF A LABORATORY EXPERIMENT**

© 2023 A.V. Ognistaya^{1,2}, T.I. Dunkai^{1,2}, I.G. Tananaev¹, Zh.V. Markina²

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

² A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology
Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
(NSCMB FEB RAS), Vladivostok, Russia

The influence of lead, cadmium, nickel, zinc and iron in concentrations corresponding to MPC and 2 MPC on the properties of *Heterosigma akashiwo* microalgae exometabolites in relation to bacteria isolated from different areas of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan was evaluated. The results obtained showed metal resistance in 8 bacteria out of 18 tested. Different effects of exometabolites of *Heterosigma akashiwo* cultivated on heavy metals (HM) against bacteria resistant to these substances were found. Stimulation of the growth of opportunistic bacteria *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Staphylococcus pasteurii* by exometabolites was revealed. In several cases, a decrease in the number of *Pseudomonas* sp. bacteria was recorded, with the addition of metabolites of microalgae grown with cadmium, lead and nickel at 10 and 20 µg/l, for *Bacillus* sp. at 20 µg/l lead, 10 µg/l and 20 µg/l cadmium, and also at 50 and 100 µg/l of iron. As a result, cadmium, lead and iron had the greatest effect on the effect of exometabolites on bacteria.

Keywords: lead, cadmium, zinc, iron, microalgae, bacteria, exometabolites

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-128-138

Albina Ognistaya, Postgraduate Student.

E-mail: alya_lokshina@mail.ru

Tatyana Dunkai Postgraduate Student.

E-mail: tdunkai@yandex.ru

Ivan Tananaev, Corresponding Member RAS, Doctor of
Chemical Sciences, Professor of the Department of Nuclear
Technologies, Far Eastern Federal University.

E-mail: geokhi@mail.ru

Zhanna Markina, Candidate of Biological Sciences,
Researcher, Laboratory of Cell Technologies.

E-mail: zhannav@mail.ru

Известия Самарского научного центра Российской академии наук

Учредитель: федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре, свидетельство ПИ № ФС77-61347 от 07.04.2015

Главный редактор: академик РАН Ф.В. Гречников

Том 25, номер 1 (111), 28.02.2023

Индекс: 36622. Распространяется бесплатно

Адрес учредителя и редакции – 443001, Самарская область,

г. Самара, Студенческий пер., За. Тел. 8 (846) 340-06-20

Издание не маркируется

Сдано в набор 15.02.2023 г.

Подписано к печати 28.02.2023 г.

Формат бумаги А4

Офсетная печать

Усл. печ. л. 16,043

Тираж 200 экз.

Заказ 40